



TITLE:

Mechanical Properties of Dual Phase Alloys Composed of Soft and Hard Phases(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Li, Hongxing

CITATION:

Li, Hongxing. Mechanical Properties of Dual Phase Alloys Composed of Soft and Hard Phases. 京都大学, 2016, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2016-05-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19893>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により本文は2019-03-31に公開; 許諾条件により要約は2017-03-22に公開; 許諾条件により要旨は2016-08-22に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	李 紅星 (LI Hongxing)
論文題目	Mechanical Properties of Dual Phase Alloys Composed of Soft and Hard Phases (軟質相と硬質相から成る二相組織合金の力学特性)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、軟質相と硬質相から成る二相組織合金が高い強度と大きな延性を併せ持つ理由を明らかにすることを目的とし、二相組織を有する低炭素鋼および Cu-Zn 合金のミクロ組織と変形挙動の相関を実験的に調査した研究結果を取りまとめたものであり、6 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論であり、本研究の背景と目的を示している。鉄鋼材料は、我々の社会で最も多量に用いられている構造用金属材料である。その用途は、建築物、パイプラインなどのインフラストラクチャー、自動車・鉄道等の輸送機器、電力・化学プラント、身の回りのデバイスなど多岐にわたっており、使い途に応じて異なる要求特性がある。近年、科学技術の発達とともに環境問題に代表される社会的な問題の重要性が高まり、構造材料にはより高い特性が求められるようになっている。例えば、自動車はその車体重量の大部分を鉄鋼材料が占めているが、燃費の向上（温暖化ガス排出抑制）のために車体の軽量化が強く求められている。一方で、衝突時の安全基準が年々厳しくなっているため、過去 10～20 年間で自動車の車体重量は実は徐々に増加している。しかしその限界も近づいているため、鉄鋼材料をはじめとする構造材料の高強度化によって、燃費の向上（薄肉化による車体重量減少）と、衝突時の安全性の向上という相反する要求を満たそうとする動きが強まっており、種々の次世代高強度鋼板 (Advanced High Strength Steels: AHSS) が活発に開発されつつある。すなわち、「強さ」と「ねばさ」の両立が、次世代高強度鋼をはじめとするこれからの先進構造材料に求められる課題であるが、一般的に材料の強度と延性・靱性はトレード・オフの関係にあり、材料の強度を高めると一般に延性・靱性は低下して、延性・靱性を確保しようとする材料の強度を低下させざるを得ない。そうした中、軟質相（フェライト）と硬質相（マルテンサイトやベイナイト）から成る組織を有する二相鋼 (Dual Phase (DP) 鋼) は、大きな加工硬化特性を示す結果、高い強度と大きな延性を両立することができ、注目を受けている。しかしながら、DP 鋼が優れた加工硬化特性を有する理由は、十分明らかになっていない。これまでに硬質第二相の体積率、分布形態、サイズなどの影響を調べた研究がなされているが、組織そのものが複雑であるため、平均的な組織パラメーターとマクロな機械的性質の比較検討にとどまっているのが現状である。本研究では、フェライト（軟質相）とマルテンサイト（硬質相）からなる低炭素鋼の二相材を作製し、熱処理によって軟質相と硬質相の間の強度比を変化させる、あるいは硬質相の割合を変化させることによってその力学特性がどのように変化するかを明らかにしようとしている。また、結晶構造の異なる軟質相と硬質相からなる Cu-Zn 合金を用い、非鉄合金二相材においても新たな知見を得ようと試みている。ナノインデンテーション法、画像相関 (Digital Image Correlation: DIC) 法や変形中その場中性子回折法などの先端的手法を用い、組織と変形挙動の関連を両相の相互作用を考慮しながら明らかにしようとしている。</p> <p>第 2 章では、1.74Mn-0.75Si-0.08C (mass%) 低炭素鋼に対して熱処理を施して、硬質相と軟質相の硬さ（強度）の比を 1.1～1.59 まで様々に変化させたフェライト＋マルテンサイト二相組織を作製することに成功し、それを用いて引張変形挙動の詳細を調べている。引張試験により得られる引張強さが、ナノインデンテーション試験により得られる二相間のナノ硬さ比との間に線形関係を有すること、一方均一伸びは、低温焼戻し処理ではナノ硬さ比が低下してもあまり変化しないが、焼戻し温度が増加して硬さ比がさらに低下すると、顕著に増大することを見出している。すなわち、二相の硬さ比が、マクロ力学特性を整理する上での良い指標となることを明らかにしている。特に、ナノ硬さ比の大きな領域では強度が増大しても 6% 程度の均一伸びが維持されることは、重要な発見で</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	李 紅星 (LI Hongxing)
<p>ある。</p> <p>第3章では、ナノ硬さ比の異なる低炭素 DP 鋼試料の引張変形中の変形挙動を、ミクロ組織中では連続している軟質フェライト相と硬質マルテンサイト相の間の相互作用に注目して、DIC 法を用いて各相内の局所塑性ひずみを精緻に測定し、変形のミクロな不均一性を調べることによって調査している。その結果、硬質相と軟質相の間の塑性ひずみ分配の様相が硬さ比によって異なり、それがマクロな力学特性に重要な影響を与えることを明らかにしている。具体的には、ナノ硬さ比がある程度以上になれば、両相間の塑性ひずみ分配が大きくなる一方、塑性ひずみの集中した変形集中領域の伝播が硬質相で妨げられることを見出している。この結果、両相の界面における変位と面力の連続性（界面における変形の適合性）を保つため、両相間の大きな塑性ひずみの違いが各相の弾性変形によって担われ、それによって生じる大きな内部応力が材料全体の変形応力を増大させ、大きな加工硬化を実現して塑性不安定を遅延させる結果、ナノ硬さ比の大きな二相鋼においては強度が増大しても十分大きな均一伸びが維持されると結論づけている。</p> <p>第4章では、硬質相（マルテンサイト）の体積率が 80%である二相組織と 29%である二相組織を上記低炭素鋼において作製し、その引張変形挙動を DIC 法などを駆使して実験的に調べている。その結果、硬質相の割合が塑性ひずみ分配に大きな影響を与え、硬質相の体積率が大きい試料の方が、硬質相と軟質相の間の塑性ひずみの違いが大きいこと、同じ硬さ比であれば、硬質相の体積率が大きい方が加工硬化能が高くなることを明らかにしている。この結果は、二相鋼において高い強度と大きな延性を両立させるためには、ある程度以上の体積率の硬質相（マルテンサイト）が存在する必要があることを示唆するものである。</p> <p>第5章では、Cu-40mass%Zn 合金の二相組織を作製し、X 線回折と SEM-EBSD 方位マッピングにより、引張試験前の二相組織が硬質相 β/β'（BCC 構造；β は不規則固溶体、β' は規則相）と軟質相 α（FCC 構造）より成ることを同定している。両相の強度（硬さ）は、ナノインデンテーション法により同定している。軟質相 α の体積率の異なる三種類の試料を熱処理過程を変化させることにより作製し、その引張特性と変形中の組織変化を詳細に調査している。その結果、軟質相 α の体積率が 18.4%と小さい試料は、15%以上の引張ひずみで顕著な強度と加工硬化率の増大を示すことを見出している。EBSD 方位マッピングと X 線回折および引張変形中の中性子その場回折により、この試料ではマトリクス β/β' 相の 3R 相（FCT 構造）への変形誘起マルテンサイト変態が生じていることを見出している。さらに 3R マルテンサイト相のナノ硬さが β/β' マトリクスのナノ硬さよりも大きいことを確認しており、変形中のより硬質な 3R 相への変形誘起マルテンサイト変態が強度と加工硬化率の急激な増大の原因であることを明らかにしている。これは、準安定オーステナイト鋼におけるいわゆる TRIP（transformation induced plasticity）と類似の現象である。また軟質相 α の体積率の異なる三種類の試料の引張試験中その場中性子回折実験を実施し、硬質相と軟質相の間に大きな応力分配が生じ、そのことも加工硬化に重要な影響を与えていることを見出している。</p> <p>第6章は総括であり、本研究で得られた結果を要約し、統括している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、軟質相と硬質相から成る二相組織合金が高い強度と大きな延性を併せ持つ理由を明らかにすることを目的とし、軟質相と硬質相からなる低炭素二相鋼および二相非鉄合金を熱処理により作製して、それらのミクロ組織と変形挙動の相関性を実験的に調査した研究結果を取りまとめたものであって、得られた主な成果は次の通りである。

1. 軟質フェライト相と硬質マルテンサイト相からなる低炭素二相鋼 (Fe-1.74Mn-0.75Si-0.08C (mass%)) を作製し、それを焼戻し熱処理することによって両相の強度比を変化させた上で、力学特性を詳細に明らかにした。室温引張試験の結果、両相間のナノ硬さ比が機械的性質を整理するための良いパラメーターとなり、特にナノ硬さ比がある値よりも大きい場合 (硬質相が軟質相よりも十分硬い場合) には、試験片全体の強度 (変形応力) が増大しても十分大きな延性が維持されることを初めて見出した。また、硬質相の体積分率が異なる二相鋼の力学特性を調査し、高い強度と十分な延性を両立させるためには、ある程度以上の体積率の硬質相を含む必要があることを示唆した。

2. DIC 法による二相組織中の局所ひずみ分布の定量化により、ナノ硬さ比が増大するとともに、両相間の塑性ひずみ分配が大きくなる一方、塑性ひずみの集中した変形集中領域の伝播が硬質相で妨げられることを見出した。この結果、両相の界面における変位と面力の連続性 (界面における変形の適合性) を保つため、両相間の大きな塑性ひずみの違いが各相の弾性変形によって担われ、それによって生じる大きな応力が材料全体の変形応力を増大させ、大きな加工硬化を実現して塑性不安定を遅延させる結果、ナノ硬さ比の大きな二相鋼においては強度が増大しても十分大きな均一伸びが維持されることを初めて明らかにした。

3. 軟質な α 相 (FCC 構造) と硬質な β/β' (BCC 構造; β は不規則固溶体、 β' は規則相) マトリクスからなる二相組織を有する Cu-40mass%Zn 合金の組織と引張変形挙動を詳細に調べ、軟質相 α の体積率が小さい試料が、15%以上の引張ひずみで顕著な強度と加工硬化率の増大を示すことを見出した。EBSD 方位マッピングと X 線回折および引張変形中の中性子その場回折により、この試料ではマトリクス β/β' 相のより硬質な 3R 相 (FCT 構造) への変形誘起マルテンサイト変態が生じており、これが強度と加工硬化率の顕著な増大の理由であることを明らかにした。また引張試験中その場中性子回折実験により、本非鉄二相合金の場合にも硬質相と軟質相の間に大きな応力分配が生じ、そのことも加工硬化に重要な影響を与えていることを明らかにした。

以上の成果をまとめた本論文は、軟質相と硬質相からなる二相鋼および非鉄二相合金の組織と力学特性の相関を、先端的な手法を用いて調査し、二相間のひずみ分配と応力分配の二つの側面から二相合金の変形挙動を明らかにしたものであって、学術上寄与するところが少なくない。本論文で得られた成果は、強度と延性を両立した二相組織材料の設計指針を与えるものであり、高強度材料の発展のための貴重な基礎的知見となることが期待される。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また平成 28 年 3 月 22 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、(平成 31 年 3 月 30 日までの間) 当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公開可能日：平成 28 年 8 月 22 日以降